

Marek JAŠEK¹

ZESÍLENÍ ZDĚNÉHO SLOUPU POMOCÍ UHLÍKOVÉ TKANINY

STRENGTHENING OF MASONRY COLUMN WITH CARBON CLOTH

Abstrakt

Příspěvek pojednává o početním posouzení zděného sloupu, který je zesílen pomocí kompozitního materiálu FRP (Fiber Reinforced Polymers) ve formě uhlíkové tkaniny. Početní posouzení únosnosti a spolehlivosti centricky namáhaného zděného sloupu je realizováno na detailním mikromodelu pro zdivo vypracovaném v nekomerční verzi softwaru ANSYS 12.

Klíčová slova

Kompozitní materiál FRP, uhlíkové tkaniny, zděný sloup, zesílení, tlak.

Abstract

This paper presents a numerical assessment of masonry column that is strengthened by a composite material FRP (Fiber Reinforced Polymers) in the form of carbon cloth. Numerical assessment of the load bearing capacity and reliability of centric loaded masonry column is implemented on a detailed micromodel for masonry and it is drawing in the nonversion software ANSYS 12.

Keywords

FRP composite material, carbon cloth, masonry column, strengthening masonry, pressure.

1 ÚVOD

Při zesilování zděných sloupů a pilířů se využívají různé metody zesilování zděných konstrukcí či prvků. Jedna z možných novodobých metod pro zesilování zděných sloupů je metoda zesílení pomocí kompozitního materiálu FRP (Fiber Reinforced Polymers) ve formě uhlíkové tkaniny. V příspěvku jsou uvedeny dílčí výsledky teoretického výzkumu nových pokročilých inovačních materiálů a technologií, které se objevily na stavebním trhu nebo jsou teprve v pokročilé fázi zkoumání viz (Jašek, 2011a).

Početní posouzení únosnosti a spolehlivosti zesíleného zděného sloupu je realizováno na numerickém modelu vypracovaném v nekomerční verzi softwaru ANSYS 12. Metoda zesílení zděného sloupu pomocí kompozitního materiálu FRP ve formě uhlíkové tkaniny je pak porovnána s nezesíleným zděným sloupem o půdorysných rozměrech 440×440 mm a o výšce $v = 3,0$ m.

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁL FRP

Kompozitní materiál FRP (Fiber Reinforced Polymers), což v překladu znamená vlákny vyztužované polymery, se nejčastěji skládá ze 2 základních složek a to:

- z vysokopevnostního vlákna,

¹ Ing. Marek Jašek, Ph.D. Katedra pozemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 927, e-mail: marek.jasek@vsb.cz.

- polymerního pojiva.

Kompozitní materiál FRP má dobré fyzikální a mechanické vlastnosti, především vysokou pevnost v tahu. Je odolný proti agresivním účinkům okolního prostředí. Dále je trvanlivý, což znamená, že významně nepodléhá reologickým vlivům v čase a to v důsledku znamená dlouhodobou životnost a minimální údržbu. Další výhodou kompozitního materiálu FRP je nízká hmotnost. Hmotnost kompozitního materiálu FRP je přibližně o 80 % nižší než u oceli a o 30 % nižší než u hliníku. S ohledem na nízkou hmotnost se zanedbatelně zvyšuje hmotnost sanované konstrukce či prvku, vlastní manipulace s kompozitním materiálem FRP je snadná a samotná realizace není namáhavá. Kompozitní materiál FRP výrazně nezvětšuje půdorysné rozměry a přizpůsobuje se drobným nepravidelnostem sanované konstrukce či prvku (Šilhan, 2009).

2.1 Fyzikálně-mechanické vlastnosti kompozitního materiálu FRP ve formě uhlíkové tkaniny

Uhlíková tkanina se aplikuje celoplošně na zděný sloup ve 3 vrstvách. Samotná realizace uhlíkové tkaniny je následující: nejdříve se nanáší penetrační nátěr, následně lepicí hmota (válečkem či štětcem) a do této vrstvy se vkládá samotná uhlíková tkanina a válečkem se zatlačí do podkladu. Před aplikací další vrstvy uhlíkové tkaniny se musí dodržet technologická přestávka o délce trvání minimálně 15 minut. Efektivní tloušťka 1 vrstvy uhlíkové tkaniny je 0,165 mm viz (Uhlíkové tkaniny Carbopree, 2010).

Při použití uhlíkové tkaniny je modelování zjednodušeno a není uvažováno s lepicí hmotou. Uhlíková tkanina je modelována jako skořepinový 4 uzlový prvek typu SHELL 63 a je ve výpočtovém modelu přímo osazena na vnější povrch zděného sloupu.

Tab. 1: Fyzikálně-mechanické vlastnosti uhlíkové tkaniny (Uhlíkové tkaniny Carbopree, 2010)

Mechanicko-fyzikální vlastnosti	HM 300
Objemová hmotnost (kg.m^{-3})	1600
Modul pružnosti v tahu (GPa)	390
Součinitel příčné roztlačnosti (Poissonův součinitel)	0,3
Tažnost (%)	0,8
Pevnost v tahu (MPa)	3000

3 STATICKÉ POSOUZENÍ ZDĚNÉHO SLOUPU

Početní posouzení kompozitního materiálu FRP ve formě uhlíkových vláken je provedeno na zděném sloupu o půdorysných rozměrech 440×440 mm a o výšce 3000 mm s fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, které jsou uvedené v předešlé a následující tabulce. Zděný sloup je vymodelován v nekomerční verzi softwaru ANSYS 12 pomocí detailního mikromodelu pro zdivo. Cihly a malta jsou po výšce rozděleny na dvě stejně vysoké části z důvodu vyhodnocení napětí a deformací v polovině výšky těchto prvků. U zděného sloupu je respektována řádná vazba zdiva. Sloup je modelován z tříčtvrtek, tloušťka ložné a styčné maltové spáry je 10 mm.

S ohledem na doposud nerealizované experimentální zkoušky jsou při modelování sloupu použity zjednodušené předpoklady chování zdiva. Zděný sloup je vymodelován jako konzolový prut bez uvažování vlivu vzpěru prvku a to z důvodu, že prvek SOLID 65 nelze použít pro geometricky nelineární úlohy. Sloup je v patě vetknutý a v hlavě zatížen dostřednou tlakovou silou. Tlaková normálová síla působící na zhlaví sloupu je zvolena o hodnotě 170 kN. Plošné zatížení zjištěné přepočtem na půdorysnou plochu pak vychází 878 kPa. Zatížení je do samotného zděného sloupu vnášeno pomocí tužšího spojovacího prvku o výšce 100 mm, který má stejné fyzikálně-mechanické vlastnosti jako cihla. Vytvořením spojovacího prvku se snažíme docílit pokud možno co nejreálnějšího přenosu zatížení do zděného sloupu.

Z důvodu zjednodušení numerického modelu a zanedbání vzpěru je potřeba brát výsledky spíše jako orientační. Jedná se o orientační parametrický výpočet, který umožňuje získat informaci o potenciálních vlivech zesílení na rozdělení napjatosti v modelovaném prvku.

3.1 Vstupní údaje materiálů

Malta a cihly jsou modelovány jako 8 uzlový prvek SOLID 65 s isotropními vlastnostmi. Cihly jsou modelovány jako fyzikálně lineární materiál, malta pak jako fyzikálně nelineární materiál. Při zadání fyzikálně nelineárního chování malty se vychází z Willam-Warnkeho podmínky plasticity (Willam, 1975). Vstupní údaje nelineárního chování malty zadávané v softwaru ANSYS jsou uvedené v (Jašek, 2011b).

Fyzikálně-mechanické vlastnosti cihel a malty jsou převzaty z experimentálních zkoušek cihel a malty (Vorel, 2007) a hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2: Fyzikálně-mechanické vlastnosti cihly a malty (Vorel, 2007)

Mechanicko-fyzikální vlastnosti	Cihly	Malta
Objemová hmotnost (kg.m^{-3})	1800	2000
Modul pružnosti v tahu a tlaku (GPa)	8,26	4,33
Součinitel příčné roztlačnosti (Poissonův součinitel)	0,15	0,2
Pevnost v tlaku (MPa)	12,7	2,5
Pevnost v tahu (MPa)	1,8	0,5

3.2 Podklad statického posouzení zděného sloupu

Pro početní posouzení je vybrán segment střední části sloupu od poloviny zdících prvků 18. řady do poloviny zdících prvků 25. řady, což odpovídá výškové úrovni od +1,3925 do +1,8425 m.

U zděného sloupu je posuzováno napětí ve směru osy x a z i deformace ve směru osy x . Pro posouzení zděného sloupu jsou jednotlivé zesilující prvky odelektovány a napětí se posuzují zvlášť pro cihly a maltu. U posouzení deformace ve směru osy x jsou cihly a malta brány jako jeden společný prvek z důvodu minimálního rozdílu výsledných deformací v obou prvcích odpovídajících řádu 10^{-6} m, přičemž deformace v maltě je nepatrně větší než deformace v cihlách.

Na následných obrázcích jsou zobrazena napětí v cihlách a v maltě, kde záporné hodnoty odpovídají tlakovému napětí a kladné hodnoty tahovému napětí. Největší tlaková napětí jsou znázorněna tmavě modrou barvou. Největší tahová napětí pak barvou červenou. Napětí jsou uvedena v jednotkách kilo Pascal, deformace pak v metrech.

V následujících tabulkách jsou použité zkratky, kde:

$\sigma_{x,max,c}$ – je maximální napětí v cihlách ve směru osy x [kPa],

$\sigma_{x,max,m}$ – maximální napětí v maltě ve směru osy x [kPa],

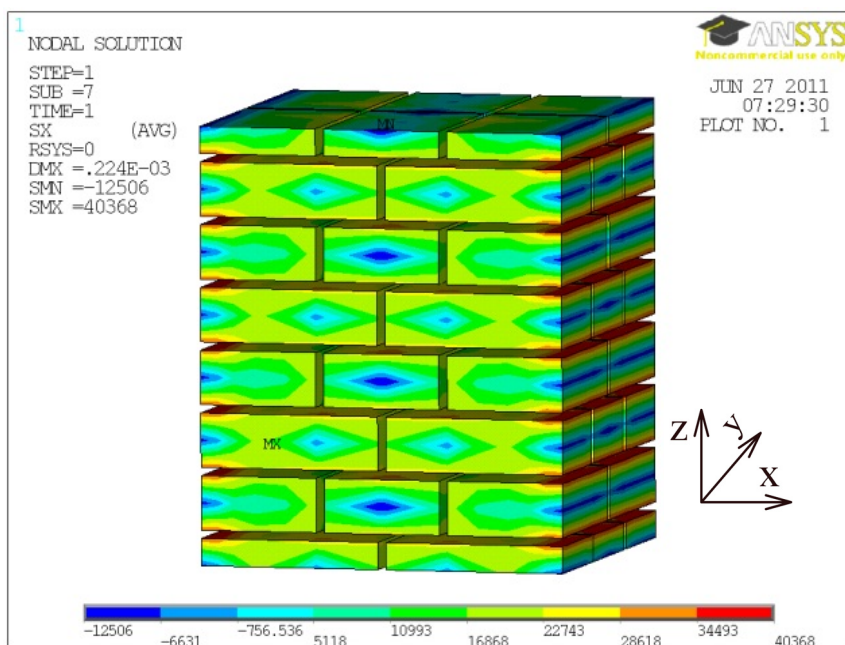
$\sigma_{z,max,c}$ – maximální napětí v cihlách ve směru osy z [kPa],

$\sigma_{z,max,m}$ – maximální napětí v maltě ve směru osy z [kPa],

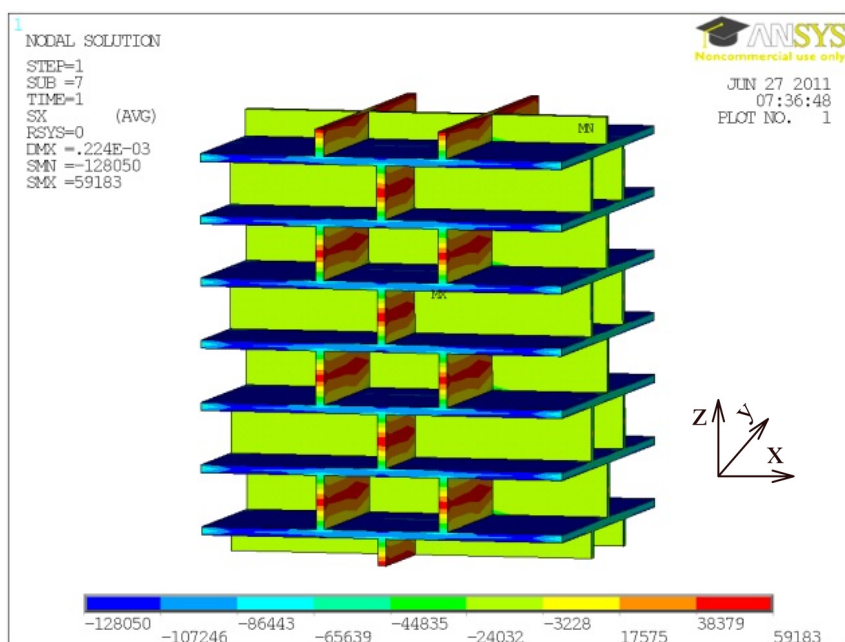
$u_{x,sloup}$ – maximální deformace zděného sloupu ve směru osy x [m].

3.2.1 Nezesílený zděný sloup

U nezesíleného zděného sloupu, který je zatížen dostřednou tlakovou silou, jsou největší tlaková napětí v cihlách ve směru osy x umístěna u povrchu zděného sloupu a to v polovině výšky cihel. Maximální tahová napětí v cihlách se pak nacházejí v oblasti ložné spáry u povrchu zděného sloupu. Ve směru osy z jsou největší lokální tlaková napětí v místě vnitřních styčných spár.

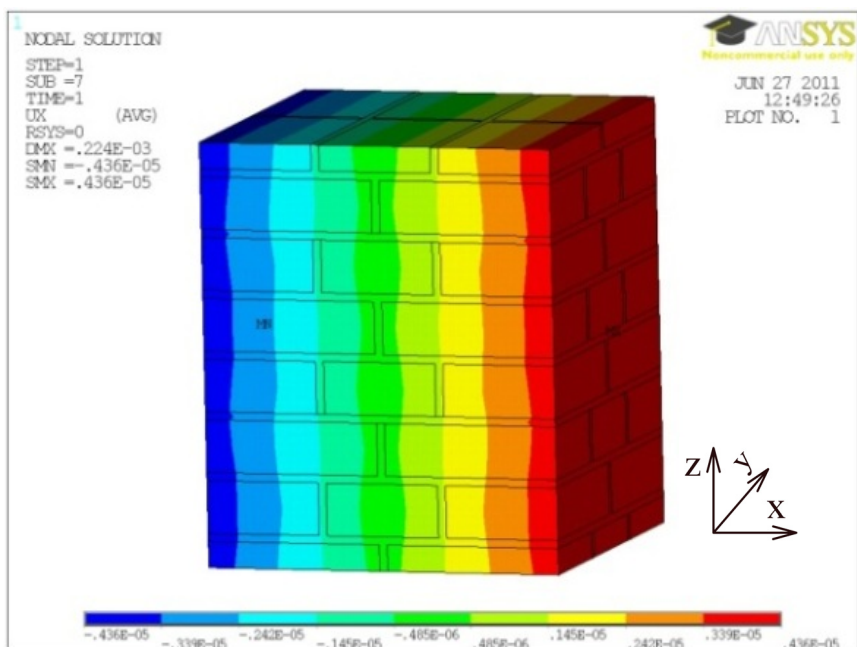


Obr. 1: Nezesílený zděný sloup: napětí v cihlách ve směru osy x



Obr. 2: Nezesílený zděný sloup: napětí v maltě ve směru osy x

V maltě jsou největší tlaková napětí ve směru osy x umístěna v ložných spárách, totéž platí i pro napětí ve směru osy z . V polovině výšky styčných maltových spár se nacházejí maximální tahová napětí ve směru osy x .



Obr. 3: Nezesílený zděný sloup: deformace sloupu ve směru osy x

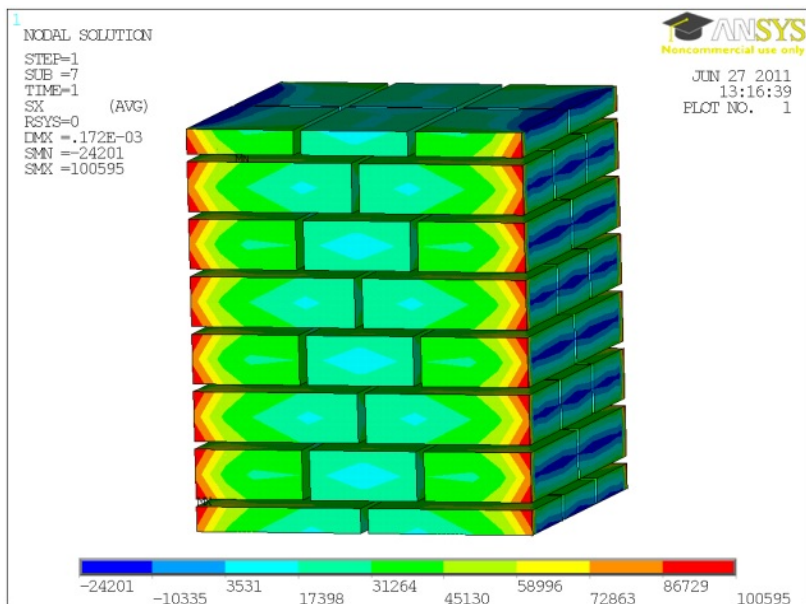
Na obr. 1 jsou znázorněna napětí v samotných cihlách nezesíleného zděného sloupu ve směru osy x , na obr. 2 pak napětí v maltových spárách. Maximální tlaková a tahová napětí pro nezesílený sloup ve směru osy x a z jsou uvedeny v tab. 3. Jak je patrné z obr. 3, maximální deformace ve směru osy x se nachází na kraji sloupu o hodnotě $4,39 \times 10^{-6}$ m.

Tab. 3: Výsledná maximální napětí a deformace pro nezesílený zděný sloup

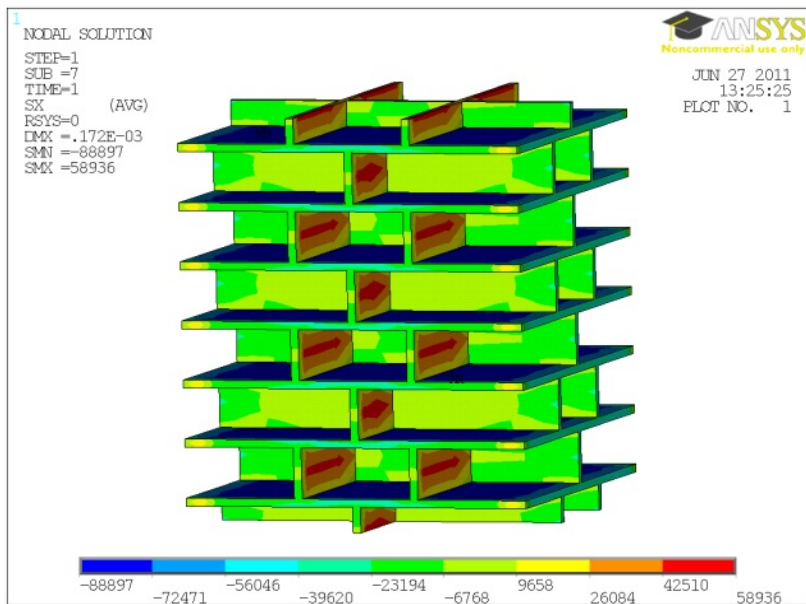
$\sigma_{x,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{x,max,m}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,m}$ (kPa)	$u_{x,sloup}$ (m)
-12,506	-128,050	-1060	-931,357	$4,39 \cdot 10^{-6}$
40,368	59,183			

3.2.2 Metoda zesílení pomocí kompozitního materiálu FRP ve formě uhlíkové tkaniny

Největší tlaková napětí v cihlách ve směru osy x se nacházejí v polovině výšky cihel u povrchu sloupu ve směru osy y . V cihlách se vyskytují největší lokální tahová napětí ve směru osy x na hranách sloupu a dosahují cca až 2,5 krát vyšších hodnot než u nezesíleného sloupu viz červená barevná škála na obr. 4. U tlakového napětí v cihlách ve směru osy z se projevuje pokles napětí přibližně o 25 % vzhledem k nezesílenému zděnému sloupu.



Obr. 4: Metoda zesílení pomocí kompozitního materiálu FRP – uhlíkové tkaniny:
 napětí v cihlách ve směru osy x



Obr. 5: Metoda zesílení pomocí kompozitního materiálu FRP – uhlíkové tkaniny:
 napětí v maltě ve směru osy x

U malty dochází k poklesu tlakového napětí ve směru osy x . Tahové napětí ve směru osy x má obdobný průběh napětí jako u nezesíleného sloupu a hodnoty napětí jsou téměř totožné. Taktéž jako u tlakového napětí v cihlách ve směru osy z se tlakové napětí v maltě ve směru osy z redukovalo. Samotná deformace sloupu ve směru osy x se snížila cca o 8 %.

Tab. 4: Výsledná maximální napětí a deformace pro metodu zesílení pomocí kompozitního materiálu FRP – uhlíkové tkaniny

$\sigma_{x,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{x,max,m}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,m}$ (kPa)	$u_{x,slop}$ (m)
-24,201 (193,5 %)	-88,897 (69,4 %)	-787,230 (74,2 %)	-774,770 (83,1 %)	$4,06 \cdot 10^{-6}$ (92,4 %)
100,595 (249,1 %)	58,936 (99,5 %)			

Pozn.: v závorce je uvedena hodnota procentuálního poměru vzhledem k nezesílenému sloupu

3.2.3 Vyhodnocení zesílení zděného sloupu

Při zvolení kritéria pro srovnání dané metody zesílení zděného sloupu a samotného nezesíleného sloupu se vychází z pevnostních vlastností materiálů zděného sloupu. V důsledku větší pevnosti zdícího prvku f_c než malty f_m , resp. modulu pružnosti zdícího prvku E_c než malty E_m , má malta tendenci k většímu poměrnému příčnému přetvoření. Malta je pak příčně „tlačena“ a zdící prvky jsou příčně „taženy“. Vzniku svislých trhlin a následnému porušení tlačného zděného prvku může předcházet vznik svislých tahových trhlin ve zdících prvcích, resp. ve styčných maltových spárách.

Pro srovnání dané metody zesílení zděného sloupu a samotného nezesíleného sloupu je vybráno jako jedno z možných kritérií posouzení tahové napětí v cihlách ve směru osy x . Při použití metody zesílení pomocí kompozitního materiálu FRP ve formě uhlíkové tkaniny dochází k výraznému nárůstu lokálního tahového napětí v cihlách ve směru osy x cca o 150 % a to jen v místě nároží (povrchu) sloupu v důsledku vzájemného spolupůsobení zdícího prvku a zesilující uhlíkové tkaniny, které je zajišťováno soudržností (adhezi) obou materiálů. Toto zvýšené povrchové napětí nemá vliv na porušení zděného sloupu z důvodu relativně vysoké pevnosti zdících prvků v tahu (rezervy pevnosti zdících prvků). V případě tlakového napětí v cihlách ve směru osy x se taktéž vyskytují zvýšené lokální napětí v místě povrchu sloupu.

Dalším možným kritériem pro srovnání dané metody zesílení je deformace zděného sloupu ve směru osy x , tzn. maximální hodnota vodorovného poměrného roztažení ve směru osy x . Deformace zděného sloupu metody zesílení pomocí kompozitního materiálu FRP ve formě uhlíkové tkaniny dosahuje snížení cca o 8 %.

4 ZÁVĚR

Na základě teoretického výzkumu zesíleného zděného sloupu zatíženého dostřednou tlakovou silou vyplývá, že metoda zesílení pomocí kompozitního materiálu FRP ve formě uhlíkové tkaniny vnáší zvýšená lokální napětí v tlaku a tahu v cihlách. Jak je patrné z obr. 4, tak zvýšená lokální napětí se nacházejí jen v místě povrchu sloupu, tzn. v místě kontaktu zděného sloupu se zesilujícím materiálem. Přičemž u zděného sloupu dochází ke snížení maximální hodnoty vodorovného poměrného roztažení ve směru osy x . Zároveň se výrazně snížilo tlakové napětí v maltě ve směru osy x . Jak také vyplývá z (Witzany, 2011), vyztužení kompozitním materiálem FRP ve formě uhlíkové tkaniny se u zděných pilířů zatížených dostřednou tlakovou silou začíná uplatňovat až vznikem a rozvojem prvních svislých trhlin ve zdivu.

Výsledky výše prezentovaných výpočtů byly stanoveny na základě určitých zjednodušených předpokladů provedených v rámci modelu. Pro verifikaci těchto výsledků je nezbytné provést experimentální ověření na zkušebních vzorcích cihelných pilířů.

Výzkumným cílem autora příspěvku je realizovat experimentální zkoušky na zkušebních vzorcích pro ověření zvoleného výpočtového modelu na nezesíleném zděném sloupu, získání poznatků o vzájemné interakci základních složek a následný vývoj nového zjednodušeného modelu materiálu. Po důsledném experimentálním ověření zvoleného numerického modelu má autor

příspěvku v úmyslu ověření „aktivování“ vyztužení kompozitním materiálem FRP ve formě uhlíkové tkaniny v důsledku vzniku a rozvoje prvních svislých trhlin ve zdivu.

Dalším cílem je ověření reálných fyzikálně mechanických vlastností zesilujících vrstev pomocí dílčích materiálových zkoušek.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek byl realizován za finanční podpory z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2012 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

LITERATURA

- [1] JAŠEK, Marek. 2011a. *Posouzení nových materiálů a technologií pro zesilování zděných konstrukcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. 187 s. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební.
- [2] JAŠEK, Marek. 2011b. Odezva zděného sloupu při zesílení cementovým kompozitem ECC. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: řada stavební*. 2011, roč. 11, č. 2, s. 127-134. ISSN 1213-1962.
- [3] ŠILHAN, Ondřej. 2009. Příklady využití dodatečné lepené syntetické FRP výztuže v pozemním stavitelství. *Sborník příspěvků 14. mezinárodního semináře: Zpevňování, těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí 2009, Ostrava, 19. – 20. února 2009*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, 2009, s. 327-330. ISBN 978-80-248-1958-7.
- [4] *Uhlíkové tkaniny Carbopree : Technický list*. 2010. Ostrava: Minova Bohemia s.r.o., 2010. 2 s.
- [5] VOREL, Jan, Jan SÝKORA a Jan NOVÁK. 2007. Experimentální a numerická identifikace materiálových parametrů zdiva. In: SÝKORA, Jan. *Engineering Mechanics 2007*. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, 2007, s. 267-268. ISBN 978-80-87012-06-2.
- [6] WILLAM, Kaspar J. a E. P. WARNKE. 1975. Constitutive models for the triaxial behavior of concrete. *Proceedings of the International Assoc. for Bridge and Structural Engineering*. 1975, vol 19, pp. 1- 30.
- [7] WITZANY, Jiří a Radek ZIGLER. 2011. Zesilování zdiva tkaninami z uhlíkových a skleněných vláken. *Stavební obzor*. 2011, roč. 20, 9/2011, s. 262-266. ISSN 1210-4027.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Kolísko Jiří, Ph.D., Oddělení experimentálních a měřicích metod, Kloknerův ústav, ČVUT v Praze.

Ing. Radek Zigler, Ph.D., Katedra konstrukcí pozemních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.